長期施用豬糞堆肥對土壤中重金屬之累積及合理施用量之評估

陳 尊 賢*

摘要：台灣地區每年約可生產1,000 萬噸以上之禽畜糞量，如能善加利用這些物質所作成之堆肥，則可確實增加土壤中之有機物含量及增加土壤之肥力。這些禽畜糞堆肥經重金屬之分析後顯示，少部份樣品之銅、鋅、鉻、與鎳等元素之含量超過現行肥料規格中重金屬含量之上限。依農業土壤中重金屬含量之背景值及研擬之污染管制值，即可估算土壤對重金屬之最大可承載量，約為鎘3 kg/ha，鉻370kg/ha，銅 300 kg/ha，鎳 180 kg/ha，鉛 140 kg/ha ，及鋅 250 kg/ha。如依現行肥料中重金屬之濃度之上限值為基準，台灣地區豬糞堆肥之最大可施用量約為500 噸/公頃， 而合理之施用量約為250 噸/公頃，可確實增加土壤中之有機物含量及增加土壤之肥力，確保土壤之品質而不致受到重金屬之污染。如依美國環保署19 93 年公告之規定，除了土壤pH 值5.5 以下，很少報告指出高量污泥施用於土壤後，銅、鎳、及鋅會對作物造成生長上之毒害或障礙，則堆肥之施用量應可更高。

關鍵詞：豬糞堆肥，有機物，銅，鋅，鉻，鎳，最大承載量，重金屬，土地施用。

前 言

由於政策的支持及台灣省畜產試驗所之研究與推廣，使得台灣之畜產業在過去幾年蓬勃發展，而每日產生之禽畜排糞量亦在 27,000 餘公噸，估計全年可達1,000 萬公噸以上。施用這些豬糞、雞糞、牛糞所作成之堆肥於台灣農田上，確實可增加各種農作物及園藝作物之產量及品質(1-3)，在台灣地區進行之田間試驗亦很多，結果顯示可確實增加土壤中之有機物含量及土壤品質。因此，如能做好禽畜糞堆肥之生產與管理，則就能確保禽畜糞堆肥之品質。因此，我們要呼籲，禽畜堆肥之品質及出路，會直接影響畜牧業之發展，亦間接影響飼料業之發展，值得大家去注意。

許多學術單位及相關農業試驗單位，亦分析過豬糞堆肥之品質，其中大家較注意的是重金屬含量偏高之問題，其中以銅、鋅、鉻、鎳、含量較高(2-8)。另外，許多有機肥料之材料中，亦有來自各種污泥，因此，其中亦可能含有重金屬物質，且其含量亦高(7)。

本文之目的為：(1)瞭解豬糞堆肥中重金屬之含量及其分佈，(2)農田土壤中重金屬含量範圍，(3)可能產生土壤污染之臨界管制濃度之建立，(4)評估長期施用豬糞堆肥後，造成重金屬累積之影響，以及(5)評估合理之堆肥施用量，且能確保土壤之品質而能永續被利用。

* 國立臺灣大學農業化學系教授

堆肥中之重金屬含量

臺灣地區各種有機物堆肥中重金屬含量於民國80年起開始被採樣分析，主要由臺大農化系、省畜產試驗所、省農試所農化系及省藥試所殘毒管制系進行之研究，經彙整後示於表一中。根據楊盛行等人(6)及Yang(8)之報告，豬糞堆肥中之重金屬全量分析結果中，主要之高含量成份爲銅1240～1970 mg/kg（平均1460 mg/kg），鋅2150～5220 mg/kg（平均3670 mg/kg），鉻 56.3～71.3 mg/kg（平均65.7 mg/kg）與鎳63.8～86.5 mg/kg（平均 80.0mg/kg）。其他重金屬之平均含量則較低，分別爲鉛65.6 mg/kg與鎘3.92 mg/kg。根據連深與李豔琪(5)收集市售71種豬糞及雞糞堆肥之重金屬含量結果（表一）指出：(1) 豬糞堆肥中重金屬含量偏高的成份分別爲銅 6 ～ 301 mg/kg（平均 101 mg/kg），鋅 35～623 mg/kg（平均232 mg/kg），鉻 3～8486 mg/kg（平均898 mg/kg）與鎳 3.5～176 mg/kg（平均32 mg/kg）。(2)雞糞堆肥中重金屬偏高的成份分別爲銅 9～394 mg/kg（平均99 mg/kg）與鋅 56～1147 mg/kg（平均286 mg/kg）。(3) 在收集之71種樣品中，有33～42％的市售堆肥，其中所含之銅、鉻、鎳超過現行肥料規格中重金屬含量之上限（即銅 100 mg/kg，鉻 150 mg/kg與鎳25 mg/kg），依規定應不能施用於田間。另有5-9 ％之市售堆肥中，其鋅含量超過肥料規格中重金屬上限 500 mg/kg。這些高含量之銅、鋅、鉻、鎳之來源主要爲飼料中銅、鋅之添加以及在堆肥製作過程中皮革粉之添加（添加鉻酸、鎳酸來搓揉皮革，其鉻、鎳含量分別佔皮革粉中之5.4％與0.03％）之故。根據陳尊賢等人調查某單位自製豬糞堆肥中重金屬含量（表一）指出：以0.1 M HCl 抽出之重金屬中，仍以銅、鋅含量較高，濃度分別爲銅 20～42 mg/kg，鋅 144～400 mg/kg，但均未超過現行肥料規格重金屬濃度之上限，而其他種類重金屬含量均甚低（＜10mg/kg）。根據林浩潭等人(7)收集全省各地37種有機質肥料進行調查之結果（表一）指出：重金屬含量較高的元素仍爲銅 1.8～254 mg/kg （平均 51.9mg/kg），鋅13.1～1480 mg/kg（平均210 mg/kg），鉻 ND～9010 mg/kg（平均695 mg/kg），與鎳 ND ～48.9 mg/kg（平均11.2 mg/kg），其中超過現行肥料規格中重金屬含量濃度上限之樣品百分比爲 3～29％，其中以鉻含量偏高。

依連深與李豔琪(5)之報告指出，在全部71個豬糞及雞糞堆肥樣品中，銅、鋅濃度與其樣品數累積頻率之分佈圖中（圖一），確實可以看出這些禽畜堆肥中確實有明顯偏高之銅、鋅含量。而現行肥料規格中有關雜項有機質肥料之鉻、鎳含量上限爲：每含1.0鹼度計，鉻不得超過0.1％，鎳不得超過0.01％。但由於雜項有機質肥料或豬糞堆肥之鹼度均相當高，故其鉻、鎳含量亦必然提高。假設鹼度爲10％之有機肥料，其鉻、鎳含量之上限可達1％（10,000 mg/kg）及0.1％（1,000 mg/kg），如依此標準，則市售之堆肥中鉻的濃度雖已達8486 mg/kg，或鎳之濃度已達 176 mg/kg，但仍未高過上限規定。在日本之「肥料取締法」中亦已公認蒸製皮革粉爲有機質肥料，也未規定鎘含量。但依中華民國肥料規格或國家標準，只規定垃圾堆肥中之鉻、鎳含量不得超過150 mg/kg與25 mg/kg，但若依此規定，顯然部份市售堆肥中鉻、鎳含量仍太偏高。綜上所述，目前臺灣地區市售禽畜堆肥中之重金屬含量偏高之元素爲銅、鋅、鉻、鎳等四元素，常超過目前肥料規格中重金屬濃度之上限，值得大家重視。

農業土壤中重金屬之含量範圍

依據陳尊賢等人(9)對臺灣地區農田土壤中重金屬調查資料（樣品數爲1550 個）之整理，研究

結果指出0.1 M HCl 可萃取之重金屬含量自然範圍爲Cd ND～0.43 mg/kg，Cr ND～11.5 mg/kg，Cu ND～25.6 mg/kg，Ni ND～12.0 mg/kg，Pb ND～18.0 mg/kg，與Zn ND～25.0 mg/kg（表2）。根據陳尊賢等人(10)及Chen and Lee(11)對臺灣地區自然農田土壤21個代表性土系之「重金屬全量分析資料」(樣品數爲100個）之整理，研究指出農田土壤重金屬全量之背景值爲As 1.80～18.9 mg/kg，Cd 1.02～3.40 mg/kg，Cr 22.9～98.9 mg/kg，Cu 7.15～35.1 mg/kg，Hg 0.04～1.62 mg/kg，Ni 18.6～66.7 mg/kg，Pb 7.50～138 mg/kg，與 Zn 30.1～392 mg/kg (表2）。如依「總量管制」來考慮維護土壤之品質，在不同種類農田土壤之重金屬全量之可能上限應爲 As 19 mg/kg，Cd 3.5 mg/kg，Cr 100 mg/kg，Cu 40 mg/kg，Hg 0.50 mg/kg，Ni 70 mg/kg，Pb 150 mg/kg與Zn 300 mg/kg (表 2)。

表一、台灣地區市售有機堆肥中重金屬含量

Table 1. The heavy metal contents of organic manure composts saled in Taiwan.

Kinds of Compost	No.	Cu	Zn	Cr	Ni	Pb	Cd	As	Hg	References
		------ mg/kg ------								
Hog	A	1460	3670	65.7	80.0	65.6	3.92	--	--	1
Hog	B	6-301	35-623	3-8486	3.5-176	0.5-60	ND-7.0	1.5-113	--	2
		(101)	(232)	(898)	(32)	(17)	(1.9)	(18)	--	
		(42%)	(5%)	(33%)	(33%)					
Hog	C	20-42	144-400	2.6-5.6	4.8-11.2	5-11	0.3-0.6	--	--	3
Chicken	D	9-394	56-1147	1-282	1.1-30	ND-183	ND-6.2	ND-27.3	--	2
		(99)	(286)	(23)	(12)	(14)	(14)	(9.6)	--	
		(33%)	(9%)	(1%)	(0%)					
Organic	E	51.9	210	695	11.2	21.8	2.52	19.6	0.04	4
Fertilizer		(5%)	(8%)	(29%)	(3%)	(5%)	--	--	--	

A： 重金屬分析爲先行高溫灰化，再以0.1M HCl 溶解測定，以平均值表示。

B&D： 重金屬全量分析。樣品總數爲豬糞堆肥36個，雞糞堆肥35個。括號爲平均濃度。括號內之百分比爲樣品濃度超過Cu 100 mg/kg，Zn 500mg/kg，Cr 150 mg/kg，及 Ni 25 mg/kg之樣品數百分比。

C： 重金屬分析爲0.1 M HCl萃取濃度。

E： 重金屬分析爲全量分析。樣品總數爲37個，以平均值表示。括號內之百分比爲樣品濃度超過肥料上限規定值之樣品數百分比

--：無資料。

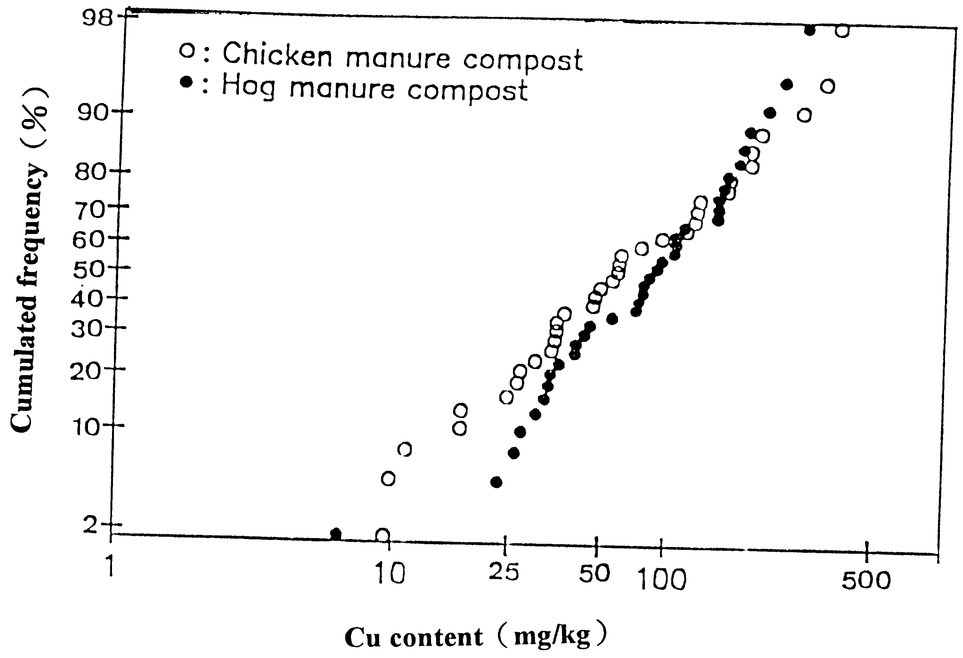
參考文獻：1.楊盛行等人（1993)

2.連深與李豔琪（1994)

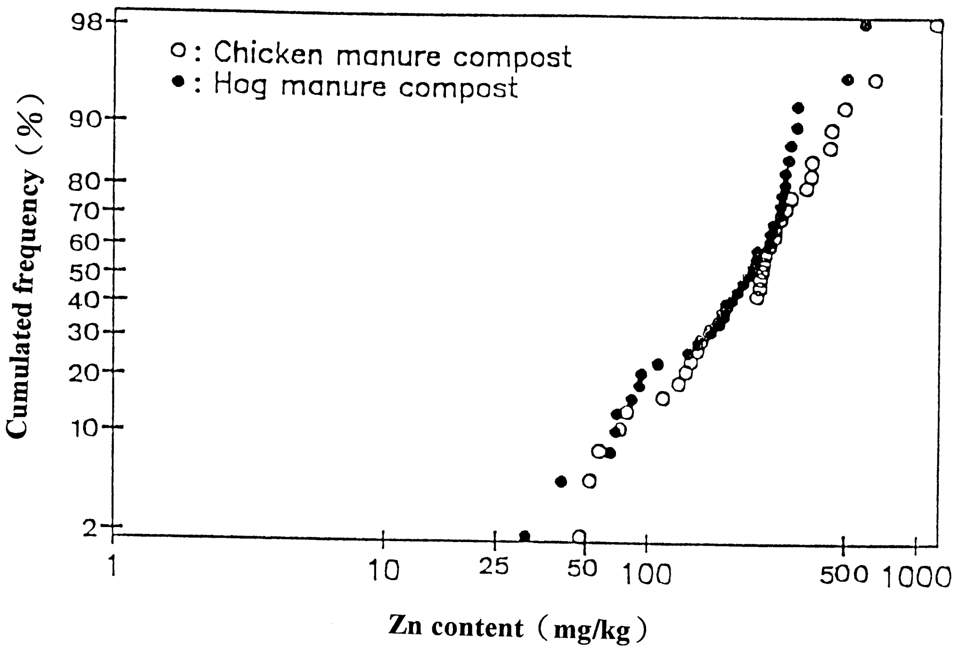
3.陳尊賢等人(1991)

4.林浩潭等人(1993)

(a)



(b)



圖一、豬糞堆肥與雞糞堆肥中銅(a)、鋅(b)含量之樣品數累積頻率分佈

Figure 1. The distribution of accumulated frequency of samples in different concentration of copper (a) and zinc (b) in the hog and chicken manure composts.

(連深、李豔琪，1994)

表二、台灣地區自然未受污染農田土壤之重金屬含量範圍
Table 2. The heavy metal contents of natural and unpolluted agricultural soils in Taiwan.

Elements	0.1M HCl extracted[a]	Total content[b]	Proposed highest total content
	---------- mg/kg ----------		
As	----	1.80-18.9 (8.88)[c]	19
Cd	ND-0.43	1.02-3.41 (1.87)	3.5
Cr	ND-11.5	22.9-98.9 (1.87)	100
Cu	ND-25.6	7.15-35.1 (21.6)	40
Hg	----	0.04-0.46 (0.23)	0.50
Ni	ND-12.0	18.6-66.7 (42.4)	70
Pb	ND-18.0	7.50-138 (39.5)	150
Zn	ND-25.0	30.1-302 (190)	300

a ：Range (陳尊賢等人, 1992; n=1550)

b ：Range (陳尊賢等人, 1993; Chen and Lee, 1995; n=100)

c ：Arithmetic mean (n=100)

農田土壤中重金屬含量污染管制值之訂定

在訂定「農田土壤中重金屬含量污染管制值」最必需考慮的因素爲(1) 對土壤可能造成污染之濃度；(2) 對作物引起毒害或明顯減產（減產20%以上）之濃度；及(3) 經由食物鏈會影響人類健康之濃度。

依據李達源與陳尊賢[12]整理臺灣地區民國76-81年農田土壤中重金屬含量調查資料（表土，0-15 cm, n=6729；裏土，15-30 cm, n=6645），除As、Hg爲全量外，其他元素均爲0.1 M HCl 抽出量。研究結果指出，土壤樣品累積頻率達90%以上之濃度爲 As 15 mg/kg（表土），21 mg/kg（裏土）；Cd 0.67 mg/kg（表土），0.41 mg/kg（裏土）；Cr 2.7 mg/kg（表土），2.0 mg/kg（裏土）；Cu 39 mg/kg（表土），1.83 mg/kg（裏土）；Hg 0.65 mg/kg（表土），0.62 mg/kg（裏土）；Ni 11.3 mg/kg（表土），7.3 mg/kg（裏土）；Pb 22.2 mg/kg（表土），22.3 mg/kg（裏土）；與Zn 37.3 mg/kg（表土），27.1 mg/kg（裏土）。

根據多位學者[13-16]提出土壤中重金屬之污染管制值（全量）爲As 20-50 mg/kg，Cd 3-8 mg/kg，Cr 50-600 mg/kg，Cu 46-280 mg/kg，Hg 1-5 mg/kg，Ni 30-100 mg/kg，Pb 100-800 mg/kg，與Zn 150-400 mg/kg。依此污染管制含量及考量臺灣地區重金屬全量背景濃度範圍（表2），則台灣土壤中重金屬之「污染管制值」可推估如表3所示。特說明如下：

(1) As 20 mg/kg：台灣地區一般農田土壤中 As 含量上限約爲18.9 mg/kg，而嘉南平原之砂頁岩沖積土中As全量最高，亦在16-18 mg/kg間，因此訂在20 mg/kg應無問題，且國外之污染臨界值亦在20-50 mg/kg，故建議爲20 mg/kg。

(2) Cd 4.0 mg/kg：台灣地區一般農田土壤中Cd 含量上限約爲3.40 mg/kg，國外之臨界值約爲3-8 mg/kg，故建議值爲4.0 mg/kg。

(3) Cr 200 mg/kg：台灣地區一般農田土壤中Cr 含量上限約爲98.9 mg/kg。國外之臨界值約爲75-100 mg/kg，如訂在100 mg/kg顯然有問題，且英國訂在600 mg/kg，爲考慮實際問題，故建議值爲200 mg/kg。

(4) Cu 200 mg/kg：台灣地區一般農田土壤中Cu含量上限約爲35 mg/kg，國外之臨界值約爲60-125 mg/kg，但考慮國內受極輕微污染之農田達150 mg/kg 恐已超過1000公頃以上，且Cu 爲動植物必需元素。英國對石灰性土壤訂在280 mg/kg，依此，建議值先暫訂爲200 mg/kg。

(5) Hg 1.0 mg/kg：台灣地區一般農田土壤中Hg 含量上限約爲0.46 mg/kg，國外之臨界值約爲0.3-5 mg/kg，德國與法國之臨界值訂爲1-2 mg/kg，考慮國內土壤現況與國外之標準，建議值可訂爲1.0 mg/kg。

(6) Ni 100 mg/kg：台灣地區一般農田土壤中Ni 含量上限約爲66.7 mg/kg，國外之臨界值上限爲100 mg/kg，今考慮國內Ni 之幾何平均數已達41.2mg/kg ，考慮實際現況，建議值爲100 mg/kg。

(7) Pb 200 mg/kg：台灣地區一般農田土壤中Pb含量上限約爲138 mg/kg，其幾何平均數僅 24.0 mg/kg，但國外之臨界值很彈性（100-800 mg/kg），且在水田土壤中，100-200 mg/kg之Pb含量尙不致對水稻造成減產，故考慮實際背景值與對作物影響下，建議值爲200 mg/kg。

(8) Zn 300 mg/kg：台灣地區一般農田土壤中Zn含量上限約爲302 mg/kg，但幾何平均數爲 157 mg/kg，但國外之臨界值爲 150-400 mg/kg，以考慮國內現有濃度及部份受影響地區土壤之濃度，建議值爲300 mg/kg。

表三、台灣地區農田土壤中重金屬全量污染管制值之訂定

Table 3. The proposed polluted controlled content of heavy metals in agricultural soils of Taiwan.

Elements	This study	Wang et al. (1994)	Proposed by other countries[a]
	mg/kg		
As	20	20	20-50
Cd	4.0	4.0	3-8
Cr	200	200	50-600
Cu	200	150	46-280
Hg	1.0	1.0	1-5
Ni	100	120	30-100
Pb	200	100	100-800
Zn	300	300	150-400

[a]：Kabata-Pendias and Pendias (1986); Page et al. (1988); Jacobs (1990); Alloway (1990)

評估長期施用堆肥可能造成之重金屬累積

本文以禽畜糞堆肥中重金屬濃度以現行肥料規格上限，施用 400 噸／公頃來評估其重金屬之累積。由於目前市售禽畜堆肥中所含重金屬之含量變化很大，因此在評估長期施用後所造成之重金屬累積，以假設施用完全符合目前肥料規格上限之濃度來加以評估。假設施用含銅100 mg/kg，鋅500 mg/kg，鉻 150 mg/kg ，鎳25 mg/kg，鉛150 mg/kg與鎘5 mg/kg之禽畜堆肥每年施用 20噸／公頃，則施用 10年後停用（共施用堆肥 200 噸／公頃）之重金屬累積濃度將增加銅 10 mg/kg，鋅 50 mg/kg，鉻15 mg/kg，鎳2.5 mg/kg，鉛15 mg/kg，與鎘 0.5 mg/kg （表 4）。如施用20年後停用（共施用堆肥400 噸／公頃），則土壤中重金屬之累積濃度將增加銅20 mg/kg ，鋅 100 mg/kg，鉻 30 mg/kg，鎳5 mg/kg，鉛 30 mg/kg 與鎘 1.0 mg/kg 。今假設土壤中重金屬之最大可承載濃度（Maximum Loading Concentration, MLC）之估算爲土壤中重金屬之管制值與背景值間之差，可用下式表示：

最大可承載濃度 ＝ 管制值濃度 － 背景值濃度 -- (1)

如再考慮臺灣地區農地土壤之背景濃度，其全量之平均值分別爲砷 8.9 mg/kg，鎘 1.8 mg/kg，鉻 43 mg/kg，銅22 mg/kg，汞 0.2 mg/kg，鎳 42 mg/kg，鉛 40 mg/kg 與 鋅 190 mg/kg（表 4）[11]，則連續施用20年禽畜堆肥後，如依王銀波等人[17-21]之管制濃度標準，土壤中之重金屬之最大可承載濃度爲As 11.1 mg/kg，Cd 0.2 mg/kg，Cr 127 mg/kg，Cu 108 mg/kg，Hg 0.8 mg/kg，Ni 73 mg/kg，Pb 30 mg/kg與Zn 10 mg/kg，故評估結果爲施用400 ton/ha 堆肥後，是全部安全，對土壤中重金屬含量之累積絕對安全。

最大可承載重金屬量之評估

土壤中重金屬含量之背景值通常是一個含量範圍值，爲計算方便起見，現以背景值之平均值爲基準來估算最大可承載濃度，其結果如表5 所示。因此，其最大可承載濃度分別爲As 11.1 mg/kg，Cd 1.2 mg/kg，Cr 157 mg/kg，Cu 128 mg/kg，Hg 0.8 mg/kg，Ni 78 mg/kg，Pb 60 mg/kg與Zn 110mg/kg。依此結果，可計算在1 公頃範圍內表土20 公分土壤中（假設容積比重爲1.2 Mg/m^3），可添加之最大承載重量（Maximum Loading Capacity, MLC, kg/ha）應爲 As 26.6 kg/ha，Cd 2.9 kg /ha，Cr 377 kg/ha，Cu 307 kg/ha， Hg 1.9 kg/ha，Ni 187 kg/ha，Pb 144 kg/ha，與Zn 264 kg/ha。

美國長期施用污泥對土壤、作物及環境之影響與評估

在美國，從1970年起至1993年止，由聯邦政府之機構（USDA-CSRS, USDAARS, USEPA）所贊助之「污泥之土地施用研究」（Land application research of sewage sludges）計畫中，共發表了876篇以技術性論文爲主之報告，其評估亦針對污泥經長期施用後對土壤、作物及地下水品質之影響[22]。這期間，被探討最多的應是氮、磷及微量元素之問題。其中影響人類食物鏈的元素包括As、Cd、Hg、Se及Zn。而會引起植物毒害的元素包括B、Cd、Cu、Ni及Zn。經由美國各研究

單位過去25年之研究，可得以下結論：

(1) 如何減少氮之淋洗至地下水影響其品質，及控制污泥轉變之重要知識(23)。

(2) 無數的實驗室與田間試驗指出，大部份之重金屬要污染地下水是不可能的，除非在很砂質地的土壤及淺層的地下水條件下(24)。

(3) 田間試驗指出，以污泥處置之土壤對作物生長有益，且作物不會累積其中之重金屬如As、Cr、Cu、Pb、Hg、Ni及Zn，且不會對消費者造成健康上之危害，但某些元素則有潛在危害，如Cd 對人體之危害，Cd、Mo及Se 對動物之危害，以及在土壤 pH < 5.5 以下時，Cu、Ni及Zn可能對植物造成生長限制(22,25-31)。

表四、評估長期施用堆肥對台灣土壤中重金屬之累積濃度及安全性

Table 4. Assessments of accumulation and safety of heavy metals in Taiwan soils for the long-term application of organic manure composts.

Elements	Background Conc. (mean)[a]	Accumulation in soils[b] (20 tons/ha/yr) Continuous apply 10 yr[c]	20 yr[c]	Proposed polluted concentration[d]	Residual maximun loading capacity after 20 yr apply[e]	Assessment of safety
	mg/kg					
As	8.9	--	--	20	11.1	Yes
Cd	1.8	0.5	1.0	3	0.2	Yes
Cr	43	15	30	200	127	Yes
Cu	22	10	20	150	108	Yes
Hg	0.2	--	--	1.0	0.8	Yes
Ni	42	2.5	5	120	73	Yes
Pb	40	15	30	100	30	Yes
Zn	190	50	100	300	10	Yes

a ：Chen and Lee (1995)

b ：假設施用禽畜堆肥中之重金屬濃度爲現行肥料規格上限，其濃度分別爲Cu 100 mg/kg, Zn 500 mg/kg, Cr 150 mg/kg, Ni 25mg/kg, Pb 150 mg/kg, As 50 mg/kg與 Cd 5 mg/kg。施用量爲20噸/公頃/年。一公頃土壤重假設爲2000噸/公頃 (15公分表土混合)。

c ：Accumulation in soils (example for Cu) at 15 cm depth. (Cu, mg/kg) = (20tons × 1000kg/ton × 100 mg/kg × 10yr) / (2000 tons × 1000kg/ton)
= 10 mg/kg

d ：王銀波等人(1994)

e ： Residual maximum loading capacity after 20 yrs application = Proposed polluted concentration - (background concentration + accumulated in soils after 20 yrs).

表五、農田土壤表土20公分重金屬最大承載量之評估

Table 5. The assessment of maximum loading capacity for heavy metals in 20 cm depth of agricultural soils.

Element	Background (mean)[a]	Polluted conc.[b]	Maximum loading concentration[c]	Maximum loading capacity at 20 cm depth[d]
	------ mg/kg ------			------kg/ha------
As	8.9	20	11.1	26.6
Cd	1.8	3	1.2	2.9
Cr	43	200	157	377
Cu	22	150	128	307
Hg	0.2	1.0	0.8	1.9
Ni	42	120	78	187
Pb	40	100	60	144
Zn	190	300	110	264

a：Chen and Lee (1995)

b：王銀波等人(1994)

c：最大可承載濃度＝管制值－背景值

d：Maximum loading capacity (kg/ha) at 20 cm depth per ha

$=$maximum loading conc. (mg/kg) $\times (100\ m)^2 \times 0.2\ m \times 1.2\ Mg/m^3 \times 10^3 / 10^6$

$=$Maximum loading concentration (mg/kg) $\times 2.4$

美國環境保護署（USEPA）在1993年公告一個污泥土地施用之標準（USEPA Part 503 sewage sludge regulation）(32-34)。在土地施用量方面，以每年施用10噸／公頃，連施100年時（即1000噸／公頃情況下），USEPA考慮了重金屬在環境中之14個路徑對人體、作物、環境之影響(31)，最後提出之施用濃度管理上限值（ceiling limit, mg/kg），累積承載量（cumulative loading, kg/ha）及污染物濃度上限（pollutant concentration limit, mg/kg），其結果如表 6 所示(33)。因此，美國環境保護署1993年所規定土壤中重金屬之施用累積量（kg/ha）為As 41，Cd 39，Cr 3000，Cu 1500，Pb 300，Hg 17，Mo 18，Ni 420 ，Se 100，及Zn 2800。比較表5與表6之最大承載量（kg/ha），目前依本文所擬之承載量比美國EPA 提出之承載量少很多，需要更進一步的探討。如依美國之承載量來加以管制，則施放入土壤之堆肥量應可超過1000公噸／公頃。在豬糞堆肥之成分中含量較高的為Cu、Cr、Ni、Zn等四元素，且這四元素在長期試驗中亦經證實不易累積在作物體中，因此應注意的是Cd對人體健康及Cd、Mo及Se對動物健康之問題。

表六、美國污泥之組成分析及美國環保署1993年503法規中污泥之施用管制上限濃度、高污染濃度上限、累積承載量及每年污染物承載速率

Table 6. Composition of sewage sludge vs Part 503 ceiling and high quality pollutant concentrations; cumulative and annual loading rates.

	Part 503 numeric criteria				NSSS results[a]	
	Table number					
Pollutant	1 Ceiling conc. limits[b]	2 Cumulative pollutant loading	3 High quality pollutant conc.limits[c]	4 Annual pollutant loading rates	Median values[d] (statistical basis) Normal	 Maximum
	mg/kg	kg/ha	mg/kg	kg/ha/yr	mg/kg	mg/kg
As	75	41	41	2. 0	5	5
Cd	85	39	39	1. 9	7	4
Cr	3000	3000	1200	150	40	39
Cu	4300	1500	1500	75	463	456
Pb	840	300	300	15	106	76
Hg	57	17	17	0. 85	4	2
Mo	75	18[e]	18[e]	0. 90[e]	11	5
Ni	420	420	420	21	29	18
Se	100	100	36	5. 0	5	3
Zn	7500	2800	2800	140	725	755

[a] USEPA, Nov. 1991. Summary of the National Sewage Sludge Survey (NSSS)

[b] Absolute values.

[c] Monthly averages.

[d] Pollutant concentrations for samples below the detection limit were incorporated into the estimates through the maximum likelihood procedure for multiple censor points to produce a better estimate than procedures that substitute either zero or the detection limit for nondetect samples.

[e] Mo values deleted on 25 Feb. 1994. New values to be proposed within 1 yr.

(Bastin, 1994)

堆肥合理施用量之評估

依據表5中之最大可承載量(MLC)之推估，再依據堆肥中重金屬之濃度，我們即可很容易計算出最大堆肥施用量，其計算式如下：

最大堆肥施用量（tons/ha）

$$\text{最大可承載估算量（kg/ha）} = \frac{\text{最大可承載估算量（kg/ha）}}{\text{堆肥中重金屬濃度（mg/kg）}} \times 10^3 \quad \text{------(2)}$$

例如在表5中，土壤中最大可承載銅量爲307 kg/ha，而堆肥中重金屬銅濃度允許上限爲300 mg /kg，依上式公式，我們可添加之最大堆肥重量爲1000噸／公頃左右。因此，在確保土壤中重金屬不會超過污染管制值之情況，我們依堆肥中重金屬可能濃度狀況下，估算其最大施肥量如表7所示。但在肥料規定中重金屬含量上限條件下，估算豬糞堆肥之最大施用量爲Cu 3000噸/公頃，Zn 500噸/公頃，Cr 2330噸/公頃與Ni 7200噸/公頃。因此，綜合來說，在此上限濃度下之最大施用量最好控制在500噸/公頃以下。

爲考慮對土壤、作物、及環境之品質，建議合理施用量應爲估算最大施用量之一半較爲安全，最好不要超過 250噸/公頃。但如能將生產堆肥之過程中，其重金屬濃度控制在銅 100 mg/kg 及鋅 200 mg/kg 以下，則最大施用量可達1250 噸/公頃，而建議合理施用量爲 600噸/公頃左右，可確實增加土壤中之有機質含量且可確保土壤品質，不會受到重金屬污染。

表七、農田土壤中合理堆肥施用總量推估

Table 7. The estimated reasonable application quantity of composts in agricultural soils.

Elements	Concentration of heavy metals	Estimated maximum loading capacity[a]	Reasonable loading capacity[c]
	------mg/kg------	------tons/ha------	
Cu	100[b]	3000	1500
	200	1500	750
	300	1000	500
Zu	100	2500	1250
	200	1250	625
	500[b]	500	250
Cr	100	3500	1750
	150[b]	2330	1160
	300	1160	580
Ni	25[b]	7200	3600
	50	3600	1800
	150	1200	600

a：肥料中重金屬含量規格上限爲Cu 100 mg/kg, Zn 500 mg/kg, Cr 150 mg/kg與 Ni 25 mg/kg。

b：依表五計算出之最大可承載量(Cu 300 kg/ha, Zn 250 kg/ha, Cr 350 kg/ha,Ni 180 kg/ha)來估算施肥量，並施用於表土20 cm內。

c：建議合理施用量爲最大施用量之一半，以確保土壤品質。

結　　論

1. 台灣地區之禽畜堆肥中對維持土壤地力及作物生產力，確實是一種很寶貴的農業資材，應推廣並有效利用之。
2. 依調查分析，部份禽畜堆肥中含有稍高含量的銅、鋅、鉻、鎳等重金屬，宜從飼料添加物中管制其濃度。
3. 依農業土壤中重金屬含量之背景值及環境中建議之污染管制值，可估算最大可承載（添加）濃度，依此估算台灣地區之最大可承載量（kg/ha）約爲 Cd 3kg/ha，Cu 300 kg/ha，Cr 370 kg /ha，Ni 180 kg/ha，Pb 140 kg/ha，及Zn 250kg/ha。
4. 依台灣地區肥料中所含重金屬含量上限規定，建議豬糞堆肥之最大可施用量爲500 公噸/公頃，而合理施用堆肥量約爲250公噸/公頃左右，仍可確保土壤品質且不致受重金屬污染。
5. 美國環境保護署在1993年所提出之報告指出，在土壤pH大於5.5時，每年施用10公噸/公頃，連續施用100年，土壤中累積之 As, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, 與Zn不會影響作物之生長與品質，應注意的是 Cd 對人體及動物所造成之潛在危害。

參考文獻

1. 簡宣裕. 1992 禽畜堆肥在園藝上之應用. 農藥世界. 第110 期: 40-43.
2. 陳尊賢. 1993 評估長期施用禽畜糞有機堆肥對農業土壤品質之影響. 禽畜飼料銅、鋅之添加對環境之影響論文集. 臺灣省畜產試驗所專輯第22號。臺灣省臺南縣. pp.116-133.
3. 陳尊賢. 1994 長期施用含重金屬之堆肥或污泥對土壤品質及作物吸收之影響. 養豬業及環保研討會論文集。台灣省畜產試驗所專輯第26號。台灣省 台南縣. pp.74-94.
4. 陳尊賢、李達源、王西華、沈韶儀. 1991 固體廢棄物之微生物處理：污泥安全性分析. 行政院環保署委託研究報告（EPA-80-E3H1-09-17）. 臺北市.
5. 連深、李豔琪. 1994 有機質肥料之重金屬含量及「肥料規格」之有關規範. 土壤與肥料污染研討會論文集. 中華土壤肥料學會主辦. 1994年4月27日. 台灣省 台中縣霧峰. pp.158-173.
6. 楊盛行、鍾仁賜、魏嘉碧. 1993. 蔬菜廢棄物及畜產廢棄物之重金屬元素含量. 第四屆土壤污染防治研討會論文集. 臺北市. pp.177-189.
7. 林浩潭、賴七仙、李國欽. 1993. 有機肥料中重金屬含量調查及對作物生長影響之評估. 第四屆土壤污染防治研討會論文集. 臺北市. pp.425-436.
8. Yang, S. S. 1994 Composts and agricultural Production in Taiwan. Soils and Fertilizers in Taiwan (1994 issues)：29-62.
9. 陳尊賢、李達源、黃東亮. 1992. 台灣地區各主要土類中重金屬含量之等級劃分. 行政院環保署委託研究報告（EPA-81-H105-09-02）. 臺北市.
10. 陳尊賢、李達源、莊皓聰、李耿肇. 1993. 台灣地區重要土系中重金屬全量之調查. 行政院環保署委託計畫報告（EPA-82-E3H1-09-01）. 台北市.
11. Chen, Z. S. and D. Y. Lee. 1995. Heavy metal contents of some representative agricultural soils in Taiwan. J. Chinese Insti. Environ. Engineering 5: (Accepted).

12.李達源、陳尊賢. 1993. 民國七十六年至八十一年土壤污染調查資料統計分析. 行政院環保署委託研究報告. 臺北市.

13.Alloway, B. J. 1990. The origins of heavy metals in soils. In: Heavy Metals in Soils. Alloway B. J. (Ed.) , John Wiley and Sons,Inc., New York. pp.29-39.

14.Jacobs, L.W. 1990. Potential hazards when using organic materials as fertilizers for crop production. Food and Fertilizer Technology Center of Asia and Pacific Regions. Extension Bulletin No. 313.

15.Kabata-Pendias A. and H. Pendias. 1984. Trace elements in soils and plants. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.

16.Page, A.L., A.C. Chang, and D.C. Adriano. 1988. Land application of municipal sewage sludge: Guideline-trace elements. In: Proceedings of the Second International Symposium on Land Application of Sewage Sludge (ISOLASS). Association for Utilization of Sewage Sludge.Jan. 26-27, 1988. Tokyo, Japan. pp. 153-181.

17.王銀波、陳尊賢、劉文徹、吳先琪、趙震慶、李國欽、王榮德. 1991. 土壤品質基準－土壤重金屬鎘、銅含量分級基準之建立. 行政院環保署委託計畫報告（EPA-80-H103-09-09）. 台北市.

18.王銀波、陳尊賢、劉文徹、吳先琪、趙震慶、李國欽、王榮德. 1992. 土壤品質基準－土壤重金屬鉛、鋅含量分級基準之建立. 行政院環保署委託計畫報告（EPA-81-H105-09-02 (1)）. 台北市.

19.王銀波、陳尊賢、劉文徹、吳先琪、趙震慶、李國欽、王榮德. 1993. 土壤品質基準－土壤重金屬鎳、鉻、砷含量分級基準之建立. 行政院環保署委託計畫報告（EPA-82-E3H1-09-01 (2)）. 台北市.

20.王銀波、陳尊賢、劉文徹、吳先琪、趙震慶、李國欽、王榮德. 1994a. 土壤品質基準－土壤重金屬汞含量分級基準之建立。行政院環保署委託計畫報告EPA-83-E3H1-09-02）. 台北市.

21.王銀波、陳尊賢、劉文徹、吳先琪、趙震慶、李國欽、王榮德. 1994b. 土壤品質基準－總論. 行政院環保署委託計畫報告（EPA-83-E3H1-09-02）. 台北市.

22.Page, A.L., and A.C. Chang. 1994 Over view of the past 25 years: Technical perspective. In: Sewage sludge: Land utilization and the environment. C.E. Clapp, W.E. Larson, and R.H. Dowdy. (Editors). American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America ,Inc., and Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI, USA . pp. 3-6.

23.Goss, M.J., D.A. Barry, D. Goorahoo, and P.S. Smith.1994. A nitrogen budget prediction of nitrate in ground water at a farm using sewage sludge. In: Sewage sludge: Land utilization and the environment. C.E. Clapp, W.E. Larson, and R.H. Dowdy.(Editors). American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc., and Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI, USA. pp. 231-236.

24.Yingming, L., and R.B. Corey. 1993. Redistribution of sludge-borne cadmium, copper, and zinc in a cultivated plot. J. Environ. Qual. 22: 1-8.

25.Chang, A. C., A. L. Page, and J. E. Warneke. 1987. Long-term sludge applications on cadmium and zinc accumulation in Swiss Chard and Radish. J. Environ. Qual. 16: 438-442.

26.Clapp, C.E., R.H. Dowdy, D.R. Linden, W.E. Larson, C.M. Harmann, K. E. Smith, T.R. Halbach, H.H. Cheng, and R.C. Polta. 1994. Crop yields, nutrient uptake, soil and water quality during 20 years on the Rosemount sewage sludge watershed. In: Sewage sludge: Land utilization and the environment. C.E. Clapp, W.E. Larson, and R.H. Dowdy. (Editors). American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc., and Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI, USA. pp. 137-148.

27.Hormann, C.M., C.E. Clapp, R.H. Dowdy, W.E. Larson, D.R. Duncomb, T.R. Halbach, and R.C. Polta. Effect of lime-cake municipal sewage sludge on corn yield, nutrient uptake, and soil analyses. In: Sewage sludge : Land utilization and the environment. C.E. Clapp, W.E. Larson, and R.H. Dowdy. (Editors). American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc., and Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI, USA. pp. 171-183.

28.Juste C. and M. Mench. 1992. Long-term application of sewage sludge and its effect on metal uptake by crops . In: Biogeochemistry of Trace Metals. D. C. Adriano (Ed.), Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, USA. pp.159-193.

29.Logan, T.J. and R.L. Chaney. 1983. Utilization of municipal wastewater and sludge on land: Metals. In: Utilization of municipal wastewater and sludge on land. A.L. Page et al. (Editors), Denver, Co., 23-25, Feb., 1983. University of California, Riverside. pp. 235-326.

30.McGrath, S. P. 1987. Long-term studies of metal transfers following application of sewage sludge. In: Pollutant transport and fate in ecosystem. Coughtrey, P. J., J. H. Mart in, and M. H. Unsworth (Eds.), Special Publ. No.6 of the British Ecological Society. (Oxford: Blackwell Scientific). pp.301-317.

31.Ryan, J.A. 1994. Utilization of risk assessment in development of limits for land application of municipal sewage sludge. In: Sewage sludge: Land utilization and the environment. C.E. Clapp, W.E. Larson, and R.H. Dowdy. (Editors). American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc., and Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI, USA. pp. 55-66.

32.U.S. Environmental Protection Agency. 1993. Standards for the use or disposal of sewage sludge. (40 CFR Parts 257, 403 and 503)-Final Rate and Phase-In Submission of Sewage Sludge Permit Application (Revisions to 40 CFR Parts 122, 123 and 501). Final Pub. Distribution by Water Environmental Federation. Stock #P0100. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.

33.Bastian, R.K. 1994. Where do we stand on regulation ? In: Sewage sludge : Land utilization and the environment. C.E. Clapp, W.E. Larson, and R.H. Dowdy. (Editors). American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc., and Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI, USA. pp. 159-169.

34.Lue-Hing, C., and R.I. Pietz. 1994. Over view of the past 25 years : Operator's perspective. In: Sewage sludge: Land utilization and the environment. C.E. Clapp, W.E. Larson, and R.H. Dowdy. (Editors). American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc., and Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI, USA. pp. 7-14.

Assessment of Heavy Metal Accumulation and Reasonable Application Quantity for Long-term Application of Hog Manure Compost in Soils

Zueng-Sang Chen

SUMMARY

More than ten milliom tons per year of hog and chicken manures were produced in Taiwan. If these manure composts can be used and applied to the agricultural soils, they will significantly increase the large amounts of soil organic matters and soil fertilities. High concentration of copper, zinc, chromium, and nickel were found in some hog and chicken manure composts saled in Taiwan and their concentration are also higher than the allowable upper limit of the concentration of heavy metals in the commercial fertilizers used in Taiwan. The maximum loading capacity (MLC) of heavy metals in soils can be estimated by the differences between the background concentration and proposed polluted controlled concentration of heavy metals in soils. The approximate value of MLC of heavy metals are Cd 3 kg/ha, Cr 370 kg/ha, Cu 300 kg/ha, Ni 180 kg/ha, Pb 140 kg/ha, and Zn 250 kg/ha. Based on the allowable upper limit concentration of heavy metals in the fertilizers and soil quality in the sustainable agriculture, the maximum and reasonable application quantity of hog manure compost in Taiwan agricultural soils can be estimated as about 500 tons/ha and 250 tons/ha, respectively. Under this quantity of application of composts, the soil quality can be maintained and not be polluted by the accumulated heavy metals. Based on the sewage sludge regulations published by USEPA in 1993, there are no documented cases of Cu, Ni, and Zn toxicity to plants grown on sludge-amended soils, except possibly on very acid soils ($pH< 5.5$).

Key Words : Hog manure compost, Organic matter, Copper, Zinc, Chromine, Nickel, Maximum loading capacity, Heavy metals, Land application.

Professor, Department of Agricultural Chemistry National Taiwan University, Taipei, Taiwan 106, ROC.